

*В.Я. Белоус, А.Д. Жирнов, А.Н. Луценко,
С.А. Мубояджян, Д.А. Александров, К.А. Хромова*

КОМБИНИРОВАННОЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СЛУЖЕБНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ ЭП866-Ш ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 450–650°C

Приведены результаты исследований комбинированного ионно-плазменного покрытия на стали ЭП866-Ш при температурах 450–650°C в различных климатических условиях.

По результатам комплекса проведенных исследований и испытаний, установлено, что покрытие СДП-1+ВСДП-20 обладает жаростойкостью и коррозионной стойкостью при температурах 450–650°C в условиях работы лопаток компрессора и промышленно опробовано на стальных лопатках компрессора ГТД.

Ключевые слова: ионно-плазменные покрытия, сталь ЭП866-Ш.

Особенности эксплуатации авиационной техники в настоящее время связаны с нехваткой двигателей, что приводит к необходимости увеличения сроков их службы (эксплуатации и хранения, до капитального ремонта), в том числе межремонтных сроков, с расширением климатических зон эксплуатации, с нарушениями сроков и объемов выполнения регламентных работ по профилактике и консервации и снижением качества ремонта. При этом ухудшается коррозионное и техническое состояние деталей и узлов двигателей. Данные эксплуатации подтверждают, что детали компрессора газотурбинных двигателей (ГТД), изготовленные из коррозионностойких (нержавеющих) сталей, работающие при температурах 400–650°C, после 7–8 лет эксплуатации (особенно лопатки компрессора) имеют на поверхности эрозионно-коррозионные повреждения в виде питтингов различной глубины.

Одним из возможных путей решения вопроса повышения эксплуатационных характеристик двигателей является более рациональное применение имеющихся материалов, используемых для их изготовления, с внедрением новых технологий, защищающих их от разрушения. При этом технологические разработки, такие как восстановительная термообработка, горячее газостатическое прессование, нанесение различного рода комбинированных покрытий на детали, приобретают важное значение. Особую актуальность эта проблема приобретает в условиях морского климата, где попадание морской воды и солевые отложения приводят к резкому возрастанию интенсивности коррозионного воздействия на материал лопаток компрессора, что сопровождается существенным сокращением их ресурса. Указанные причины вызвали необходимость создания специальной антикоррозионной защиты, одним из вариантов которой является нанесение на перо лопатки соответствующих защитных покрытий.

Экспериментальный анализ коррозионной стойкости большой группы металлических материалов различного состава, таких как слои чистых металлов (Cr, Ta, Mo, Ni), сплавы на основе никеля (Ni–Cr, Ni–Al, Ni–Cr–Al–Y, Ni–Co–Cr–Al–Re–Y), диффузионные слои из сплавов на основе алюминия (Al, Al–Si, Al–Si–B, Al–Si–Cr) и комбинированные покрытия общей толщиной 10–30 мкм, в контакте с жаропрочной сталью ЭП866 и сплавом ЭП718-ИД показал, что наиболее перспективными являются комбинированные двухстадийные покрытия, получаемые последовательным нанесением слоев данных материалов (толщиной до 30 мкм) с последующим формирующим отжигом.

Однако при испытаниях на жаростойкость и коррозионную стойкость повышение температуры испытаний до 600°C привело к существенному сокращению числа вариантов защитных покрытий, обеспечивающих высокую коррозионную стойкость композиции сплав–покрытие. Наибольшей стойкостью обладали образцы с

двухслойными комбинированными покрытиями следующих типов: (Co–Ni–Cr–Al–Ta–Y)+(Al–Co–Si–Y), (Co–Cr)+(Al–Co–Si–Y), (Ni–Cr)+(Al–Cr–Y), (Co–Ni–Cr–Al–Y)+(Al–Co–Si–Y). При этом лучшие показатели по совокупности всех испытаний (разные температуры и разные материалы основы) имело покрытие системы (Co–Ni–Cr–Al–Y)+(Al–Co–Si–Y).

Термостатирование образцов из стали ЭП866-Ш проводили в течение 100 ч при температурах 450, 550 и 650°C в муфельной электропечи марки «Термокерамика» с воздушной атмосферой. Перед проведением нагревов поверхность образцов подвергалась обезжириванию и пассивации.

Коррозионные испытания после длительных нагревов проводили тремя методами: в условиях камеры солевого тумана (КСТ-35); по методике ускоренных циклических испытаний (УЦКИ); в условиях морского умеренно теплого климата. Для исследования коррозионной стойкости были изготовлены образцы–шайбы диаметром 18 мм, толщиной 3 мм (с отверстием) с дополнительным шлифованием перед нанесением покрытия.

Испытания проводили в соответствии с нормативными документами (ГОСТ 9.909–86).

Режим работы КСТ-35:

| | |
|--|----------------------|
| температура, °С | 35 |
| влажность, % | 98–100 |
| распыляемый раствор | 3%-ный NaCl |
| периодичность подачи раствора, мин | 20 |
| продолжительность распыления | 16 мин в течение 1 ч |
| Общая продолжительность испытаний, мес | 3. |

Оценка коррозионной стойкости проводилась по результатам металлографического анализа.

Методика *ускоренных циклических испытаний* (УЦКИ) стали предназначена для проведения ускоренных сравнительных испытаний коррозионностойких сталей и защитных покрытий, применяемых в ГТД. Испытания проводили в соответствии с нормативными документами (ГОСТ 9.012–73). При испытаниях имитируется воздействие на детали и узлы компрессора ряда факторов: последовательное чередование нагрева при заданной температуре (450, 550 и 650°C) и охлаждения, воздействие коррозионно-активных сред.

Схема проведения ускоренных циклических испытаний (1 цикл): нагрев до температуры 450°C (или 550°C, или 650°C), выдержка 1 ч → подстуживание на воздухе, охлаждение распылением 3%-ного NaCl → выдержка в камере влажности в течение 22 ч.

Ускоренные циклические коррозионные испытания оказывают более жесткое коррозионное воздействие, чем испытания в КСТ-35, так как циклически изменяющаяся температура (нагрев 1 ч, затем подстуживание, охлаждение) увеличивает скорость коррозии.

На испытания были выставлены два типа образцов:

- образцы–шайбы, для оценки коррозионного воздействия;
- корсетобразные образцы, для последующего проведения испытаний с определением предела выносливости (ГОСТ 25.502–79).

В процессе испытаний проводился периодический осмотр образцов после 1-го, 5-го и 10-го циклов. Общая продолжительность испытаний: 10 циклов. Окончательный осмотр образцов проводили после удаления продуктов коррозии. Оценка коррозионной

стойкости проводилась по результатам изменения массы образцов и металлографического анализа.

Натурные испытания в условиях морского климата. Сущность метода заключается в экспонировании образцов в атмосферных условиях на коррозионных станциях с последующей оценкой коррозионной стойкости. Выбор станций и условий размещения на них образцов соответствуют предполагаемым условиям эксплуатации изделий, в которых будут использованы испытуемые материалы и покрытия. Натурные испытания дают подтверждение правильности выбора материалов и методов их защиты.

Испытания проводили в соответствии с нормативными документами (ГОСТ 9.909–86) при экспозиции образцов:

– в Геленджикском центре климатических испытаний (ГЦКИ) – в жалюзийной будке (ж.б.) и под навесом (с ежедневным обрызгиванием морской водой);

– на Северной коррозионной станции (СКС) – в жалюзийной будке (ж.б.) и под навесом.

На атмосферную коррозию были выставлены два типа образцов: образцы–шайбы – для оценки коррозионного воздействия; корсетообразные образцы – для последующего проведения испытаний по определению предела выносливости.

На испытания были выставлены стальные образцы в следующих состояниях:

– без покрытия (исходное состояние);

– после нагрева при 450°С образцов без покрытия;

– с покрытием + нагрев при 450°С.

Продолжительность испытаний 2 года.

Потенциостатический метод исследований был применен для сравнительной оценки коррозионно-электрохимических свойств стали и покрытия, а также для определения влияния нагревов на защитные свойства покрытия.

Электрохимические исследования проводили с помощью универсального потенциостата – гальваностата ИРС-про с автоматической записью с использованием электрохимической ячейки с хлорсеребряным электродом сравнения, подсоединенным через солевой мостик, и вспомогательным электродом. В качестве среды испытания использовали 3%-ный раствор NaCl.

Перед снятием поляризационных кривых поверхность образцов зачищали абразивной шкуркой и обезжировали. На всю поверхность образца, за исключением небольшого участка площадью порядка 1 см², наносили клей АК-20, обладающий диэлектрическими свойствами. Образцы с помощью медного провода соединяли с потенциостатом (место соединения изолировали клеем) и погружали в электролит, заполняющий электрохимическую ячейку. После выдержки в течение 30 мин и формирования на поверхности образца стационарного потенциала, снимали анодные поляризационные кривые от потенциала, на 200 мВ «отрицательнее» установившегося стационарного потенциала.

Полученные поляризационные кривые перестраивали в среде EXCEL в координатах «логарифм плотности тока–потенциал».

Измерения стандартного электродного потенциала проводили в течение 3 сут.

Испытания на усталость проводили после лабораторных ускоренных циклических и после натурных коррозионных испытаний – для определения влияния образовавшихся коррозионных повреждений на циклическую прочность.

Определение предела многоциклового выносливости проводили в соответствии с нормативными документами (ГОСТ 25.502–79). Использовались нестандартные корсетообразные гладкие цилиндрические образцы с удлиненной рабочей частью для увеличения площади вероятного образования коррозионных повреждений. Часть образцов была подвергнута перед нанесением покрытия пескоструйной обработке – для увели-

чения на поверхности напряжений сжатия, что улучшает сцепление покрытия с основным материалом и в большинстве случаев обеспечивает более высокие значения предела выносливости образцов.

Анализ результатов испытаний на жаростойкость (рис. 1) двухстадийного покрытия на образцах из сплава ЭП718-ИД и стали ЭП866-Ш при выдержке в спокойной воздушной атмосфере печи в течение 500 ч при температуре 600°C показал, что покрытие обладает высокой жаростойкостью и окалинстойкостью в условиях проведенных испытаний.

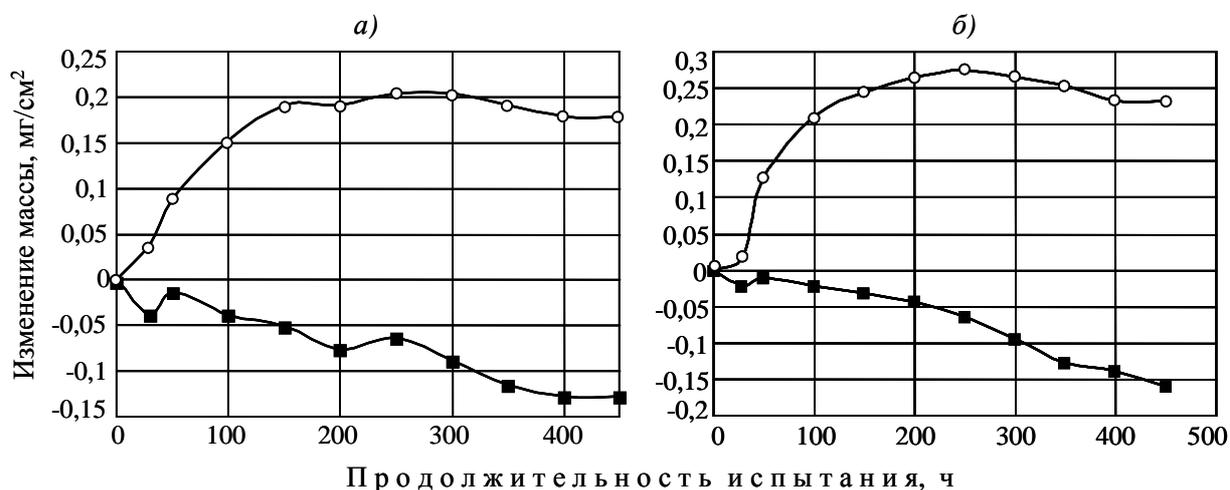


Рис. 1. Жаростойкость (при температуре 600°C) стали ЭП866-Ш (а) и сплава ЭП718-ИД (б) без покрытия (■) и с двухстадийным покрытием (Co–Ni–Cr–Al–Y)+(Al–Co–Si–Y) (СДП-1+ВСДП-20) (○)

Исследовали состояние поверхности образцов из стали ЭП866-Ш с покрытием СДП-1+ВСДП-20 после термостатирования в течение 100 ч при температурах 550 и 650°C. При данном исследовании проводилась качественная сравнительная оценка жаростойкости стали без покрытия и с покрытием. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты макроанализа и металлографического анализа поверхности образцов после термостатирования

| Температура термостатирования, °С | Состояние поверхности образцов из стали | |
|-----------------------------------|---|---|
| | без покрытия | с покрытием |
| Без термостатирования | Поверхность светлая с металлическим блеском, шероховатость не превышает $R_z=2,5$ мкм | Поверхность цвета мокрого асфальта; средняя толщина покрытия ~10–15 мкм |
| 550 | Оксидная пленка сине-коричневого цвета | Поверхность цвета мокрого асфальта; толщина покрытия ~15–17 мкм |
| 650 | Оксидная пленка сине-фиолетового цвета | |

На образцах без покрытия после термостатирования при 550 и 650°C толщина оксидной пленки составляет ~5–7 мкм. Цвет образцов изменяется от сине-коричневого до сине-фиолетового (см. табл. 1).

На образцах с покрытием после термостатирования образуется плотная оксидная пленка Al_2O_3 , деструкции покрытия не обнаружено независимо от температуры нагрева.

При оценке результатов испытаний образцов с покрытием главным фактором являлось отсутствие повреждения самой стали – подложки, повреждение покрытия допускалось.

Оценка состояния поверхности после коррозионных испытаний приведена в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний в КСТ-35 стали ЭП866-Ш без покрытия и с покрытием

| Покрытие | Режим термостатирования | Время до начала коррозии, сут | Площадь коррозионных повреждений, % | Глубина питтингов, мм |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|--|-----------------------|
| Без покрытия (исходное состояние) | Без нагрева | 30 | 20–50% (единичные язвы, питтинги) | 0,05–0,2 |
| | 450°C, 100 ч | 10 | 30–70% (много язв, питтингов) | 0,05–0,08 |
| | 550°C, 100 ч | 6 | 80–90% (рыхлый слой бурых продуктов коррозии) | 0,05–0,08 |
| | 650°C, 100 ч | 6 | 80–90% (рыхлый слой бурых продуктов коррозии) | 0,05–0,08 |
| С покрытием СДП-1+ВСДП-20 | Без нагрева | Нет | Нет (60% – белые точки продуктов коррозии покрытия) | Нет |
| | 450°C, 100 ч | То же | Нет (единичные точки продуктов коррозии покрытия: 5–10%) | То же |
| | 550°C, 100 ч | -«- | Нет (10–20% – белые точки продуктов коррозии покрытия) | -«- |
| | 650°C, 100 ч | -«- | Нет (единичные рыжие точки на ребрах образца; 30% – белые точки продуктов коррозии покрытия) | -«- |

На образцах в исходном состоянии (без нагрева) первые локальные коррозионные повреждения появились через 30 сут испытаний. После 3 мес испытаний диаметр питтингов и язв увеличился до ~1,5 мм и глубина до ~0,05 мм (на отдельных участках – до 0,2 мм). Полученные данные свидетельствуют о том, что сталь ЭП866-Ш при испытаниях в условиях КСТ-35 обладает недостаточной коррозионной стойкостью. Это связано с недостаточным количеством хрома для образования плотной пассивной пленки (часть хрома связана в карбид $Me_{23}C_6$) и с гетерогенной структурой (мартенсит с частицами карбида).

На образцах после термостатирования уменьшается время до начала образования коррозионных поражений и увеличивается их площадь (см. табл. 2). После нагревов практически вся поверхность образцов (от 80 до 100%) покрыта толстым слоем рыхлых бурых продуктов коррозии, под которыми образуются мелкие питтинги диаметром 0,1–0,5 мм, глубиной ~0,05 мм. Это связано с тем, что оксидная пленка, образовавшаяся за 100 ч, не является достаточно плотной. Через поры в пленке электролит воздействует на подповерхностный слой, который обеднен хромом в результате образования поверхностного оксида. Это приводит к образованию рыхлых продуктов коррозии.

На образцах с покрытием без нагрева образуются единичные белые точки продуктов коррозии покрытия. Через три месяца испытаний ~60% поверхности образцов покрыто такими мелкими белыми точками. На образцах с покрытием (без термостатирования) количество повреждений больше, чем после нагревов при 450, 550 и 650°C. Это связано с изменением состояния поверхности при термостатировании. На образцах без нагрева в электролите с ионами Cl^- образуются продукты коррозии в виде гидрооксида алюминия. На образцах после нагрева, за счет образовавшейся плотной оксидной

пленки Al_2O_3 , продуктов коррозии подложки не обнаружено, за исключением единичных точек, образовавшихся на ребрах образцов, после нагрева при температуре $650^{\circ}C$.

Металлографические исследования образцов стали ЭП866-Ш с покрытием и без него после испытаний в КСТ-35 проводили с целью определения глубины коррозионных поражений (табл. 3).

Таблица 3

Результаты металлографического анализа стали ЭП866-Ш после коррозионных испытаний в КСТ-35

| Состояние образцов | Режим термостатирования | Размеры коррозионных повреждений |
|--------------------|-------------------------|--|
| Без покрытия | Без нагрева | Единичные питтинги $\varnothing 0,1$ мм, глубиной 0,03–0,05 мм. В зоне подвески образцов единичные питтинги глубиной до 0,1–0,2 мм |
| | 450°C, 100 ч | Единичные питтинги глубиной 0,05–0,08 мм |
| | 550°C, 100 ч | Питтинги диаметром 0,1–1,5 мм, глубиной 0,05 мм |
| | 650°C, 100 ч | То же |
| С покрытием | Без нагрева | На отдельных участках деструкция покрытия (шелушение, скол глубиной 0,05–0,07 мм) |
| | 450°C, 100 ч | На отдельных участках деструкция покрытия |
| | 550°C, 100 ч | Единичные участки повреждения покрытий протяженностью 1–2 мм, глубиной 0,04–0,08 мм. Коррозионных повреждений подложки нет |
| | 650°C, 100 ч | То же |

Таблица 4

Результаты коррозионных испытаний стали ЭП866-Ш в условиях ГЦКИ и СКС после 1 года испытаний

| Состояние образца | Климатическая станция | Условия испытаний | Вид коррозионных повреждений | Количество коррозионных повреждений на 1 см^2 | Размер питтингов, мм | |
|--|-----------------------|--|--|--|----------------------|----------|
| | | | | | диаметр | глубина |
| Без покрытия (исходное состояние) | ГЦКИ | В жалюзийной будке (ж.б.) | Мелкие питтинги | 15–18 | 0,1–0,45 | 0,05 |
| | | Под навесом с ежедневным обрызгиванием | | 28–30 | 0,1–0,45 | 0,05 |
| | СКС | В ж.б. | То же | 13–16 | 0,15–0,55 | 0,05 |
| | | Под навесом | | 20–23 | 0,1–0,65 | 0,05–0,1 |
| То же + термостатирование при $450^{\circ}C$ | ГЦКИ | В ж.б. | -«- | 17–20 | 0,1–0,45 | 0,05 |
| | | Под навесом с ежедневным обрызгиванием | | 17–20 | 0,1–0,7 | 0,05 |
| | СКС | В ж.б. | -«- | 18–21 | 0,15–0,5 | 0,05–0,1 |
| | | Под навесом | | 22–25 | 0,15–0,85 | 0,05–0,1 |
| С покрытием + термостатирование при $450^{\circ}C$ | ГЦКИ | В ж.б. | Локальная деструкция поверхности покрытия. Коррозионных поражений подложки не обнаружено | (4–5)* | (0,4–3,5)* | – |
| | | Под навесом с ежедневным обрызгиванием | | (4–5)* | (0,4–5,65)* | – |
| | СКС | В ж.б. | | (3–4)* | (0,35–1)* | – |
| | | Под навесом | | (10–13)* | (0,2–2,7)* | – |

* Указанные размеры относятся к зонам частично поврежденного покрытия.

**Результаты коррозионных испытаний стали ЭП866-Ш в условиях ГЦКИ и СКС
после 2 лет испытаний**

| Состояние образца | Климатическая станция | Условия испытаний | Вид коррозионных повреждений | Площадь коррозионных повреждений, % | Размер питтингов, мм | |
|---|-----------------------|--|---|-------------------------------------|------------------------|--------------|
| | | | | | диаметр | глубина |
| Без покрытия (исходное состояние) | ГЦКИ | В ж.б. | Мелкие питтинги. На отдельных участках широкие растравы | 5 | 0,15–0,3 | 0,05 (0,1)** |
| | | Под навесом с ежедневным обрызгиванием | | 5–8 | 0,2–0,5 | 0,05 |
| | СКС | В ж.б. | | 5–10 | 0,05–0,2 | 0,05–0,1 |
| | | Под навесом | | 8–10 | 0,15–0,3 | 0,05–0,1 |
| То же + термостатирование при 450°C | ГЦКИ | В ж.б. | То же | 80–90 | 0,025–0,05 (0,3–0,5)** | 0,05 |
| | | Под навесом с ежедневным обрызгиванием | | 40–50 | 0,05–0,1 (0,2–0,4)** | 0,05 |
| | СКС | В ж.б. | | 80–90 | 0,15–0,5 | 0,025–0,05 |
| | | Под навесом | | 50–60 | 0,15–0,85 | 0,05–0,1 |
| С покрытием + термостатирование при 450°C | ГЦКИ | В ж.б. | Локальная деструкция поверхности покрытия. Коррозионных поражений подложки не обнаружено. Солевые отложения в месте крепления | (1–2)* | 0,05* | – |
| | | Под навесом с ежедневным обрызгиванием | | (1–2)* | 0,05* | – |
| | СКС | В ж.б. | | (1–2)* | 0,05* | – |
| | | Под навесом | | (8–10)* | 0,05* | – |

* Указанные размеры относятся к зонам частично поврежденного покрытия.

** Размеры незначительного количества питтингов (цифры в скобках).

На исходных образцах (без покрытия) стали ЭП866-Ш после испытаний в КСТ-35 образуются питтинги глубиной ~0,05 мм. В зоне подвески образцов, где скапливается влага (раствор 3%-ного NaCl), образуются единичные питтинги глубиной до 0,1–0,2 мм.

После предварительных нагревов (450, 550 и 650°C) глубина коррозионных повреждений составляет 0,05–0,08 мм, однако диаметр коррозионных повреждений увеличился до 1,5 мм. На образцах после нагревов при 450°C коррозионные повреждения более глубокие – до 0,08 мм, что связано, вероятно, со структурными изменениями, происходящими в стали при этой температуре (расслоение по хрому).

На образцах с покрытием СДП-1+ВСДП-20 коррозионные повреждения после испытания в течение 3 мес в условиях КСТ-35 отсутствуют. На отдельных участках наблюдается деструкция поверхностного слоя покрытия глубиной 0,05–0,07 мм. Коррозионных повреждений подложки (стали ЭП866-Ш) не обнаружено.

Результаты испытаний в натуральных климатических условиях после экспозиции в течение 1 года представлены в табл. 4.

По представленным данным видно (см. табл. 4), что на образцах из стали ЭП866-Ш, количество коррозионных повреждений поверхности после испытаний под навесом больше, чем после испытаний в жалюзийной будке. Это связано с тем, что навес не защищает образцы от воздействия ветра и попадания капель морской воды на их поверхность, т. е. обеспечивает более жесткие условия испытания.

Образцы, после термостатирования, экспонировавшиеся на СКС по сравнению с образцами, экспонировавшимися в ГЦКИ, имеют больше коррозионных повреждений вследствие более жестких условий испытания, а именно более высокого содержания

хлор-ионов в атмосфере. Это связано также с тем, что после предварительных нагревов сталь меняет свой фазовый состав и становится более чувствительной к коррозионным воздействиям.

На образцах с покрытием – как в условиях жалюзийной будки, так и под навесом – наблюдается только локальная деструкция поверхностного слоя покрытия, повреждения подложки не обнаружено.

Результаты испытаний в натуральных климатических условиях после экспозиции в течение 2 лет представлены в табл. 5.

По сравнению с образцами, экспонированными в течение 1 года, образцы после 2 лет испытаний имеют большее количество повреждений, особенно после дополнительных нагревов при 450°C, вследствие этого оценку коррозионных поражений проводили не по количеству питтингов, а по площади поврежденной поверхности. Кинетика коррозионных повреждений стали с покрытием и без него в течение 1 года и 2 лет натуральных испытаний представлена на рис. 2.

Результаты измерения стандартного электродного потенциала приведены в табл. 6.

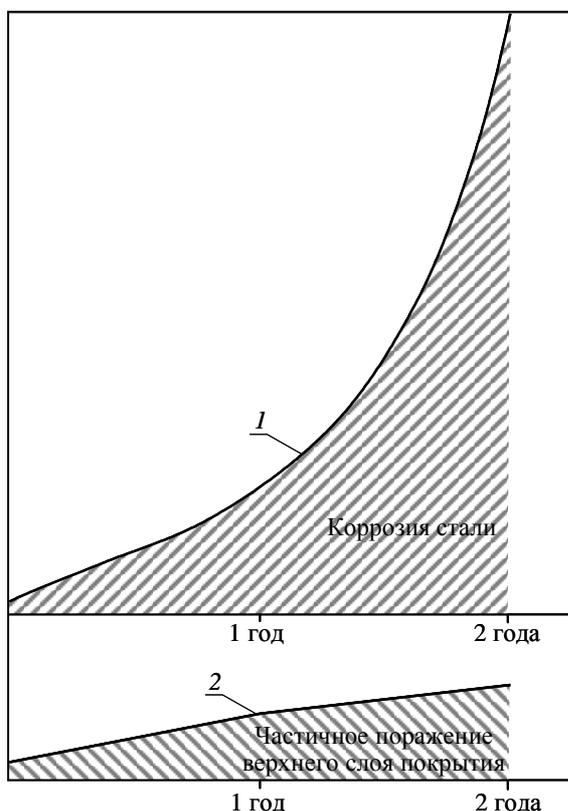


Рис. 2. Кинетика коррозионных повреждений (схема) стали без покрытия (1) и с покрытием (2) в условиях натуральных испытаний

Таблица 6

Результаты исследования стандартного электродного потенциала образцов из стали ЭП866-Ш

| Состояние образцов | Температура термостатирования, °С | Электродный потенциал, мВ, после испытаний в течение, ч | | | | | | | |
|--------------------|-----------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0 | 0,5 | 1 | 19 | 22 | 24 | 25 | 67 |
| Без покрытия | Без нагрева | +37 | +41 | +144 | +154 | +160 | +160 | +157 | +189 |
| | 550 | -120 | -319 | -327 | -333 | -336 | -338 | -335 | -310 |
| | 650 | -196 | -334 | -331 | -324 | -326 | -327 | -329 | -333 |
| С покрытием | Без нагрева | -383 | -390 | -394 | -396 | -392 | -381 | -375 | -398 |
| | 550 | -340 | -377 | -401 | -390 | -387 | -389 | -387 | -398 |
| | 650 | -264 | -282 | -284 | -346 | -358 | -371 | -382 | -407 |

Данные табл. 6 показывают, что начальный потенциал стали ЭП866-Ш равен +37 мВ, через трое суток установившийся потенциал составляет +190 мВ. Начальный потенциал покрытия СДП-1+ВСДП-20 составляет -380 мВ, установившийся (через 3 сут) – приблизительно -400 мВ. После длительных нагревов при температуре 550 и 650°С в течение 100 ч величина установившегося потенциала покрытия практически не меняется и составляет около -400 мВ.

Полученные данные подтверждают, что покрытие СДП-1+ВСДП-20 остается анодным по отношению к подложке и сохраняет свою протекторную защиту и после длительных нагревов.

Пределы выносливости образцов стали с покрытием и без него после натуральных испытаний показаны в табл. 7.

Таблица 7

**Результаты испытаний стали ЭП866-Ш на многоцикловую усталость
после коррозионного воздействия**

| Состояние образцов | Наличие пескоструйной обработки | Режим термостатирования | Коррозионные испытания | Предел выносливости, σ_{-1} , МПа, при температуре испытания, °С | | |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------|---|---|-----|----------|
| | | | | 450 | 550 | 650 |
| Без покрытия | Нет | 450°С, 100 ч | Без испытаний | 440 | – | – |
| | | | В ГЦКИ: под навесом (1 год) в ж.б. (2 года) | 420 | – | – |
| | | | | 400 | – | – |
| | Есть | 450°С, 100 ч | Без испытаний | 560 | – | – |
| УЦКИ: 450°С↔20°С | | | 480 | – | – | |
| 550°С, 100 ч | | | – | 380 | – | |
| | 650°С, 100 ч | То же | – | – | 240 | |
| С покрытием | Нет | 450°С, 100 ч | В ГЦКИ: под навесом (1 год) в ж.б. (2 года) | 400 | – | – |
| | | | | 395 | – | – |
| | | | Без испытаний | 460–480 | – | – |
| | Есть | 450°С, 100 ч | УЦКИ: 450°С↔20°С | 480 | – | – |
| 550°С, 100 ч | | | – | 340 | – | |
| 650°С, 100 ч | | | То же | – | – | 180*–200 |

* Предел выносливости стали в исходном состоянии при 650°С: $\sigma_{-1}^{650} = 180$ МПа (данные справочника «Авиационные материалы», том 3, ВИАМ, 1989 г.).

Известно, что нанесение покрытий в большинстве случаев приводит к снижению предела выносливости сталей. Результатами настоящих исследований подтверждено, что нанесение покрытия приводит к снижению σ_{-1} стали независимо от температуры термостатирования. Наклеп поверхностного слоя (обдувка корундом) повышает значения σ_{-1} стали на 15%, по сравнению со шлифованными образцами (см. табл. 7).

После испытаний образцов в течение 1 года под навесом с ежедневным обливом морской водой (ГЦКИ) предел выносливости образцов с покрытием остается примерно на том же уровне (400 МПа), как и у образцов после двух лет экспозиции в жалюзийной будке (395 МПа).

Образцы с покрытием и без него с предварительным термостатированием при температуре 450°С после 2 лет экспозиции в жалюзийной будке ГЦКИ имеют практически одинаковый предел выносливости: 395 и 400 МПа. Полученные значения предела выносливости свидетельствуют о том, что на образцах без покрытия предел выносливости снижается на ~10%, а на образцах с покрытием, следовательно, снижения не произошло.

Коррозионные испытания в жалюзийной будке привели к снижению значений σ_{-1} стали ЭП866-Ш без покрытия в большей степени, чем испытания под навесом, вероятно, из-за большей продолжительности испытаний.

По полученным экспериментальным данным были построены кривые усталости стали (рис. 3).

Испытания образцов с предварительной пескоструйной обработкой показали более высокие значения предела выносливости (см. рис. 3). На образцах после термостатирования при температурах 550 и 650°C предел выносливости образцов стали с покрытием ниже, чем у стали без покрытия (см. табл. 7).

Приведенные для сравнения справочные данные значений $\sigma_{-1}^{650^\circ}$ стали без покрытия при температуре испытаний 650°C (см. табл. 7) показывают, что нанесение покрытия не снижает ниже допустимого значение предела выносливости основного материала даже после термостатирования при 650°C.

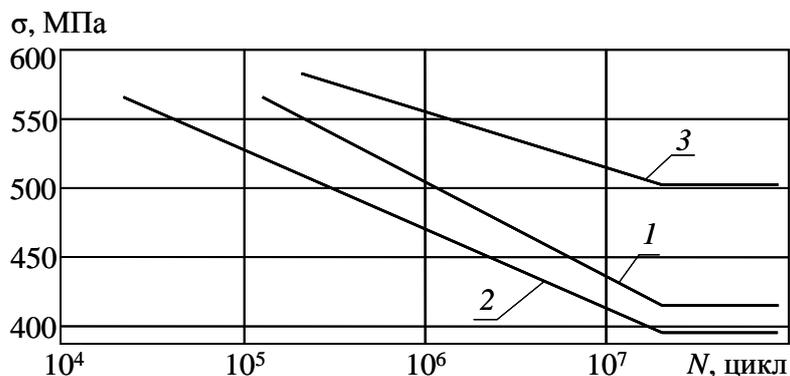


Рис. 3. Кривые усталости образцов стали ЭП866-Ш после коррозионных испытаний: 1 – без покрытия + термоциклирование при 450°C+ГЦКИ (1 год); 2 – с покрытием + то же; 3 – с пескоструйной обработкой под покрытие + термоциклирование при 450°C + УЦКИ

Таким образом, для повышения коррозионной стойкости жаропрочной стали ЭП866-Ш, используемой для изготовления рабочих компрессорных лопаток современных газотурбинных двигателей, опробовано комбинированное ионно-плазменное покрытие СДП-1+ВСДП-20. Установлено, что сталь с покрытием имеет высокую стойкость в условиях электрохимической коррозии – как при лабораторных, так и в натуральных испытаниях в условиях морского климата. Показано, что комбинированное покрытие СДП-1+ВСДП-20 является анодом по отношению к стали ЭП866-Ш и обеспечивает ее протекторную защиту, которая не снижается даже после длительных нагревов при температурах 550 и 650°C.

Термостатирование и термоциклирование при температурах 450–650°C, соответствующие реальным условиям эксплуатации лопаток компрессора ГТД, показали, что на образцах с покрытием скорость окисления снижается вследствие образования на его поверхности оксида на основе Al_2O_3 .

Натурные коррозионные испытания в условиях климатических станций ГЦКИ и СКС (в жалюзийной будке и под навесом с ежедневным обрызгиванием морской водой) подтвердили защитные способности покрытия на стали ЭП866-Ш. Частичная деструкция внешнего слоя покрытия не затрагивает внутренние слои покрытия, и сталь (матрица) при этом коррозии не подвергается.

Усталостная прочность образцов стали ЭП866-Ш с покрытием после термостатирования при температурах 450–650°C и после ускоренных циклических испытаний находится на уровне нижнего предела доверительного интервала для материала основы и незначительно (на 8–10%) снижается после натуральных испытаний, т. е. практически не изменяется, что обеспечит ресурс и надежность лопаток и других деталей компрессора ГТД при использовании ионно-плазменного покрытия в морских климатических условиях.

По результатам комплекса проведенных исследований и испытаний установлено, что покрытие СДП-1+ВСДП-20 обладает жаростойкостью и коррозионной стойкостью при температурах 450–650°C в условиях работы лопаток компрессора и промышленно опробовано на стальных лопатках компрессора ГТД.